

VERBETEREN VAN GOLFVOORSPELLING DOOR ASSIMILATIE VAN SATELLIETGEGEVENS

J.-R. BIDLOT^{1,3}, W. LUO^{2,4},
J. MONBALIU², F. OVIDIO¹,
D. VAN DEN EYNDE¹

¹ Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee, Brussel

² Laboratorium voor Hydraulica, K.U.Leuven

³ European Centre for Medium Range Weather Forecast, Reading, UK

⁴ Proudman Oceanographic Laboratory, Birkenhead, UK

IMPROVEMENT OF WAVE FORECASTING BY ASSIMILATION OF SATELLITE DATA

In the framework of a European Space Agency ERS-1 pilot project, hindcasts from the second generation wave forecasting system MU-Wave, operationally used by the Belgian coastal authorities, were compared to ERS-1 data and buoy data. Also a model intercomparison with the third generation WAM-model was carried out.

In an attempt to reduce some of the shortcomings illustrated by this model validation, an optimal interpolation scheme for assimilation of satellite data was implemented off-line for the

second generation wave forecasting system. Results show that a significant improvement can be expected in regions of high satellite density, however model physics approximations and the simplicity of the selected assimilation scheme limit the spreading of the appropriate corrections to shallow water regions where the benefits of the assimilation were mainly sought. A discussion on the opportunities for enhancing the abilities of wave forecasting for the Belgian coastal waters is given.

INLEIDING

Het kennen van de golftoestand heeft belangrijke toepassingen. Daarbij kunnen we onder andere denken aan scheepvaartbegeleiding, waarden voor golfhoogtes bij het ontwerp van constructies voor kustverdediging en golfcondities bij de berekening van sedimenttransport in de kustzone.

Om golfcondities te kunnen voorspellen, maakt men gebruik van wiskundige modellen. Voor de voorspelling van golftoestanden aan de Belgische kust kan men voor het ogenblik gebruik maken van twee modellen, namelijk van het dagelijks operationele model MU-WAVE of van het WAM-model.

Door de BMM (Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee) en door het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven werd een European Space Agency (ESA) ERS-1 piloot-onderzoeksproject uitgevoerd met als doel enerzijds de kwaliteit van zowel het MU-WAVE als het WAM-model te evalueren en anderzijds de kwaliteit van de operationele voorspellingen te verbeteren door de assimilatie van satellietgegevens. Bij deze evaluatie worden boeigegegevens als onafhankelijke data-bron gebruikt.

1. DE MODELLEN MU-WAVE EN WAM EN HUN IMPLEMENTATIE

1.1 De modellen

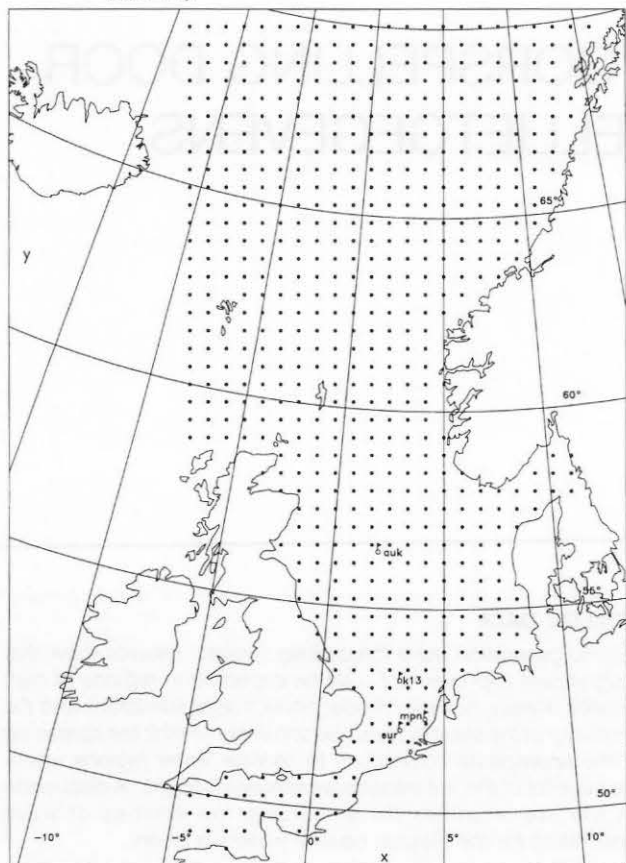
Het MU-WAVE model werd reeds beschreven door Van den Eynde en De Wolf (1990). Het is een model van de tweede generatie. Karakteristiek voor een tweede generatiemodel is de parametrisatie van het golvenspectrum. De parametrisatie bestaat enerzijds in de scheiding tussen windzee (lokaal gegenereerde golven) en deining (golven niet langer onderhevig aan het lokale windveld), en anderzijds in de beschrijving van de windzee met slechts een beperkt aantal parameters. Een verandering van de energietoestand van het zeeoppervlak wordt berekend door enerzijds de voortplanting van deiningsgolven te berekenen, en anderzijds door de parameters voor de windzee aan te passen, rekening houdend met het groeien van de golven onder invloed van de wind en met het verlies van golfenergie door breking of wrijving met de bodem. De overdracht van energie van deining naar windzee of van windzee naar deining wordt op een gepaste wijze in rekening gebracht. Hierbij heeft de parametrisatie als voordeel dat slechts een 'beperkte' rekencapaciteit nodig is, maar als nadeel dat snelle veranderingen in de toestand van de zee, bijvoorbeeld bij snel passerende depressies, minder nauwkeurig kunnen voorspeld worden.

Het WAM-model is een model van de derde generatie (WAM staat voor Wave Model en is ondertussen een geijkte uitdrukking geworden; men spreekt ook dikwijls van een WAM-type model als men het heeft over een model van de derde generatie). Een model van de derde generatie wordt gekarakteriseerd door een volledig diskrete beschrijving van het energiespectrum en van de brontermen en heeft als dusdanig geen artificiële scheiding tussen windzee en deining. Het WAM-model met zijn fysische achtergrond en met verwijzing naar talrijke toepassingen en vooruitzichten voor verdere verbeteringen, wordt uitvoerig beschreven in Komen et al., (1994). In diep en minder diep water wordt het WAM-type model als state-of-the-art beschouwd. Voor ondiep water weet men dat er nog heel wat beperkingen zijn bij dit model.

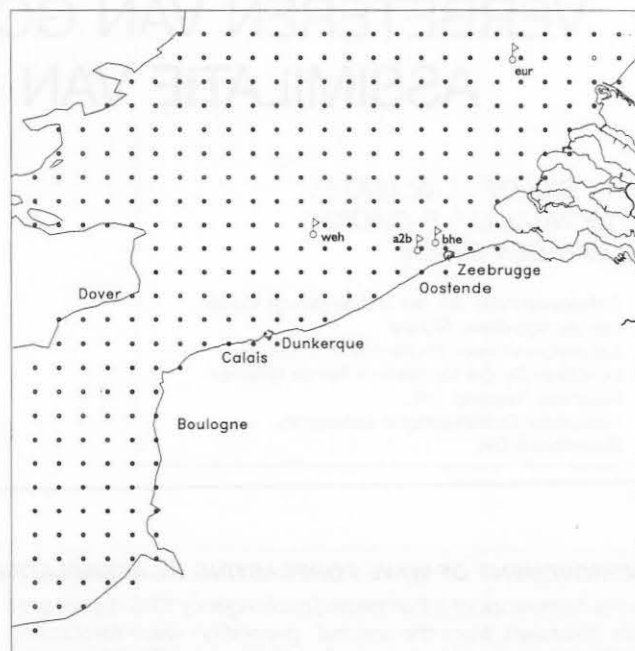
1.2 Implementatie

Beide modellen werden op hetzelfde rooster met dezelfde bathymetrische gegevens geïmplementeerd om onderlinge vergelijking gemakkelijker te maken. Het modelgebied bestrijkt de volledige Noordzee met een grof rooster van 50 km x 50 km. De uitbreiding naar het noorden is noodzakelijk om deiningenergie te kunnen onderscheppen. Deining kan namelijk ver weg gegenereerd worden en daarna grote afstanden afleggen zonder noemenswaardig energieverlies.

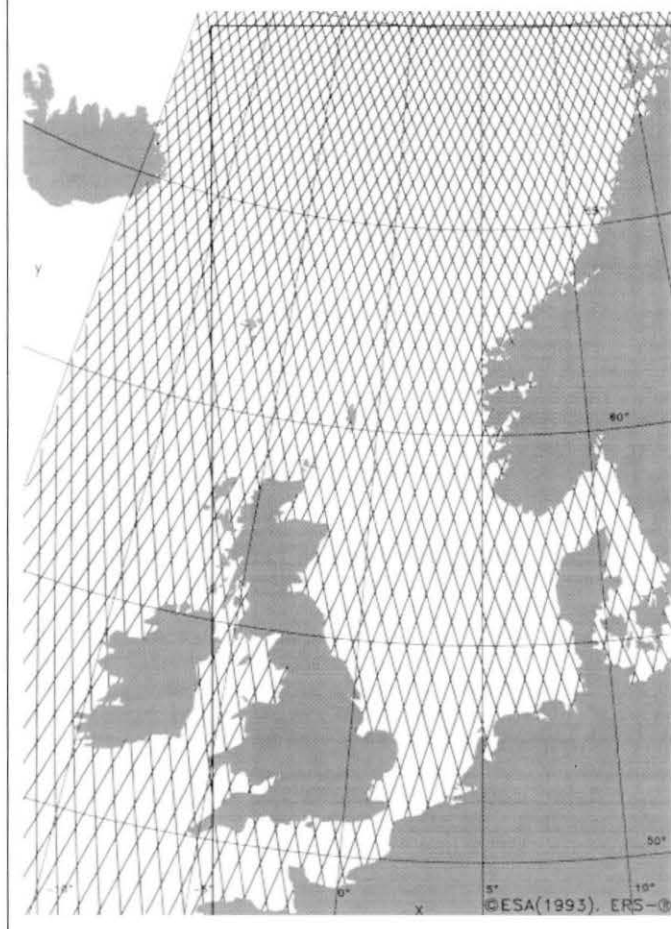
Figuur 1 : Grof grid met aanduiding van de golfboeilocaties (zie ook Tabel 1.a)



Figuur 2 : Fijn grid met aanduiding van de golfboeilocaties (zie ook Tabel 1.b)



Figuur 3 : Grondspoordensiteit van de ERS-1 satelliet voor de herhalingscyclus van 35 dagen. De dikke lijn duidt het modelgebied aan. Lengte- en breedtecirkels worden om de 5° aangeduid.



Gekoppeld aan het grove rooster, heeft men een fijn rooster van 10 km x 10 km voor het gebied van de zuidelijke Noordzee (zie figuur 1 en 2).

2. DE MEETGEGEVENS

2.1 Satellietgegevens

De ERS-1 (European Remote Sensing Satellite-1) werd gelanceerd door ESA op 17 juli 1991. De satelliet beschrijft een ongeveer polaire baan rond de aarde. Twee opeenvolgende doorgangen op dezelfde plaats worden gescheiden door 35 dagen in de tijd (zie figuur 3). Voor deze studie waren wij enkel geïnteresseerd in de instrumenten die ons iets konden vertellen over de toestand van de zee en/of de windkracht die op het zeeoppervlak wordt uitgeoefend. Daartoe kwamen volgende instrumenten in aanmerking:

1. radar altimeter:

kan zowel significante golfhoogte als wind meten; doordat het ontvangen signaal moet uitgemiddeld worden, is de resolutie ongeveer 6.5 km langs de satellietbaan; de nauwkeurigheid voor de golfhoogte wordt geschat op 0.5 m of 10% (het hoogste van de twee); de gegevens worden dan nogmaals uitgemiddeld over groepen van 8, zodat uiteindelijk een resolutie van 52 km bekomen wordt, wat dus ongeveer gelijk is aan de resolutie van het grof model; de nauwkeurigheid van de gemeten altimeter windsnelheid is van dezelfde grootte-orde als die gemeten met de wind scatterometer (zie onder).

2. wind scatterometer:

de wind scatterometer meet over een gebied rechts van de satellietbaan de windsnelheid en de windrichting; de gegevens van de

windvectoren worden zodanig verwerkt dat ook hier met een resolutie van 50 km x 50 km verkregen wordt; men schat de nauwkeurigheid op ± 2 m/s of 10% (het grootste van de twee) en dit binnen het interval 4-24 m/s; de richting zou correct zijn tot op $\pm 20^\circ$.

3. synthetic aperture radar (SAR):

deze sensor werd tot nu toe nog niet gebruikt in de vergelijkende studie; gegevens van deze sensor zouden moeten toelaten meer informatie dan alleen maar de significante golfhoogte te bekomen; dit instrument kan iets vertellen over zowel de richtings- als de frekwentiesamenstelling van tenminste een gedeelte van het energiespectrum van de golven.

De periode waarvoor gegevens bij ESA werden opgevraagd was van de periode oktober 1992 tot maart 1993. Deze periode is voldoende lang om zowel kalme periodes als een aantal winterstormen in te sluiten.

2.2 Boeigegevens

Boeigegegevens werden opgevraagd bij AWK (Afdeling Waterwegen Kust van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap) en bij

TABEL 1.a golfboeilocaties in het grof rooster

Station	Code	Breedtegraad	Lengtegraad	Bron
Platform Auk	auk	56 23'59"N	2 03'56"E	RIKZ
Platform k13	k13	53 13'01"N	3 13'12"E	RIKZ
Meetpost Noordwijk	mpn	52 16'26"N	4 17'46"E	RIKZ
Munitiestort IJmuiden	ym6	52 33'00"N	4 04'00"E	RIKZ

TABEL 1.b golfboeilocaties in het fijn rooster

Station	Code	Breedtegraad	Lengtegraad	Bron
Eurolplatform	eur	51 59'55"N	3 16'35"E	RIKZ
Lichteiland Goeree	leg	51 55'05"N	3 40'02"E	RIKZ
A2-boei	a2b	51 21'58"N	3 07'47"E	AWK
Bol van Heist	bhe	51 22'46"N	3 12'32"E	AWK
Akkaert	akk	51 24'49"N	2 46'18"E	AWK
Westhinder	weh	51 55'05"N	2 26'30"E	AWK

het RIKZ (Rijksinstituut voor Kust en Zee) in Nederland. Posities van de verschillende boeien worden gegeven in Tabel 1. De boeien werden ook aangeduid op figuren 1 en 2.

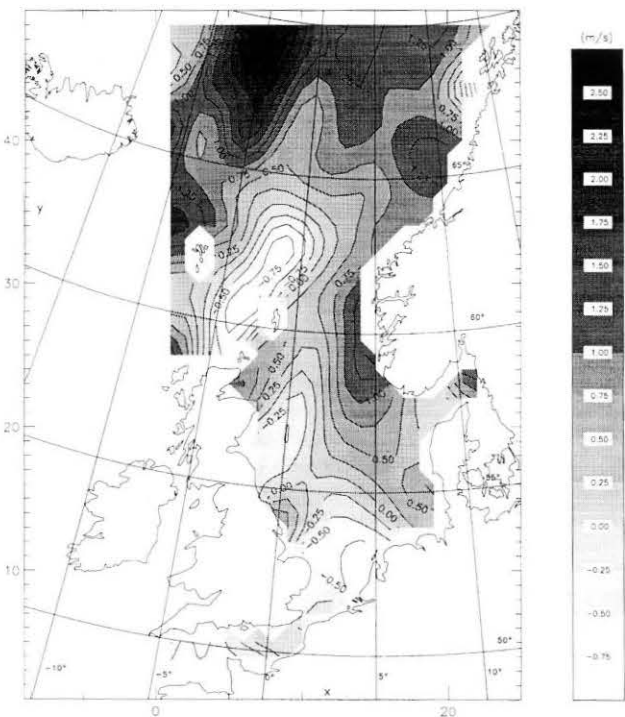
3. VERGELIJKING VAN DE WIND

Het staat buiten twijfel dat de kwaliteit van de voorspelde windvelden een belangrijke

rol speelt bij het al dan niet correct voorspellen van golftoestanden. Meteorologen hebben de laatste jaren echter aanzienlijke inspanningen geleverd om de kwaliteit van hun voorspellingen te verbeteren. Data-assimilatietechnieken, waarbij meetgegevens zoals de satellietgegevens van ERS-1 gebruikt worden om de resultaten van het computermodel bij te sturen, worden in de meteorologie al geruime tijd succesvol toegepast.

Figuur 4a: Gemiddeld verschil in windsnelheid over de volledige periode tussen de uitgemiddelde altimeter waarnemingen en de UKMO windvelden. (©ESA(1993).ERS-®.)

Altimeter vs Model Oct. 1 92 - Mar. 31 93

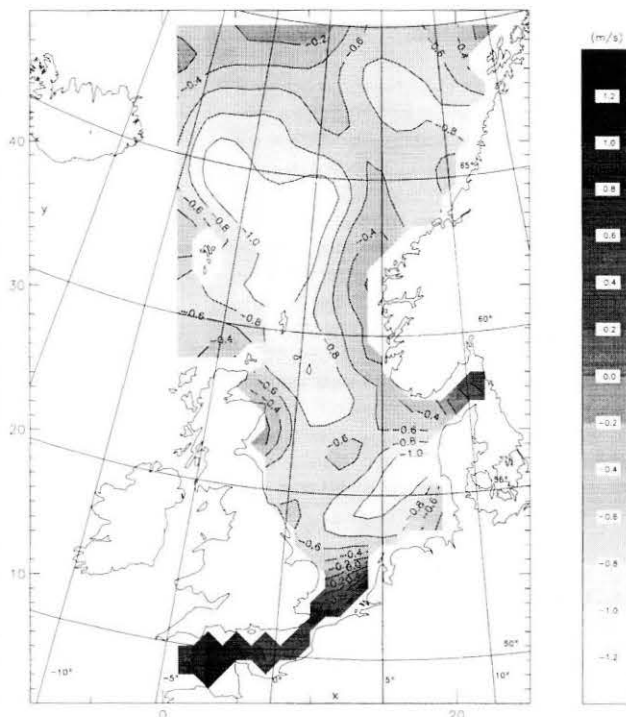


Wind speed mean difference

Wed Apr 27 11:55:09 MET DST 1994

Figuur 4b: Gemiddeld verschil in windsnelheid over de volledige periode tussen de uitgemiddelde scatterometer waarnemingen en de UKMO windvelden. (©ESA(1993).ERS-®.)

Scatterometer vs Model Oct. 1 92 - Mar. 31 93



Wind speed mean difference

Tue Apr 26 13:04:48 MET DST 1994

Een vergelijking van de gebruikte UKMO (United Kingdom Meteorological Office) wind en de altimeter en scatterometer waarnemingen kan men vinden in de figuren 4a en 4b. Een positief verschil (bias) wil zeggen dat de wind in het model onderschat wordt. Typische waarden voor de Noordzee zijn een bias van 0.15 m/s voor wat betreft de altimeter-winden en -0.51 m/s voor wat betreft de scatterometer-winden. De RMSE's ('root mean square errors') bedragen respectievelijk 1.62 m/s en 2.07 m/s voor het gebied van de Noordzee. Alhoewel de winden niet perfect zijn, kan men toch besluiten dat ze zeker in het voor de Belgische kust belangrijkste gebied, de Noordzee, van vrij goede kwaliteit zijn.

4. HINDCASTS EN VERGELIJKING MET SATELLIET- EN BOEIGEGEVENS

Er werd een hindcast uitgevoerd voor de zes maanden waarvoor satellietgegevens beschikbaar waren. Hindcast is een 'voorspelling' voor het verleden. Men probeert dus de vroegere toestand te reconstrueren. Daartoe beschikt men over geanalyseerde windvelden, dit wil zeggen windvelden die zijn bijgewerkt door het gebruik van waarnemingen van bijv. windsnelheden, druk en temperatuur.

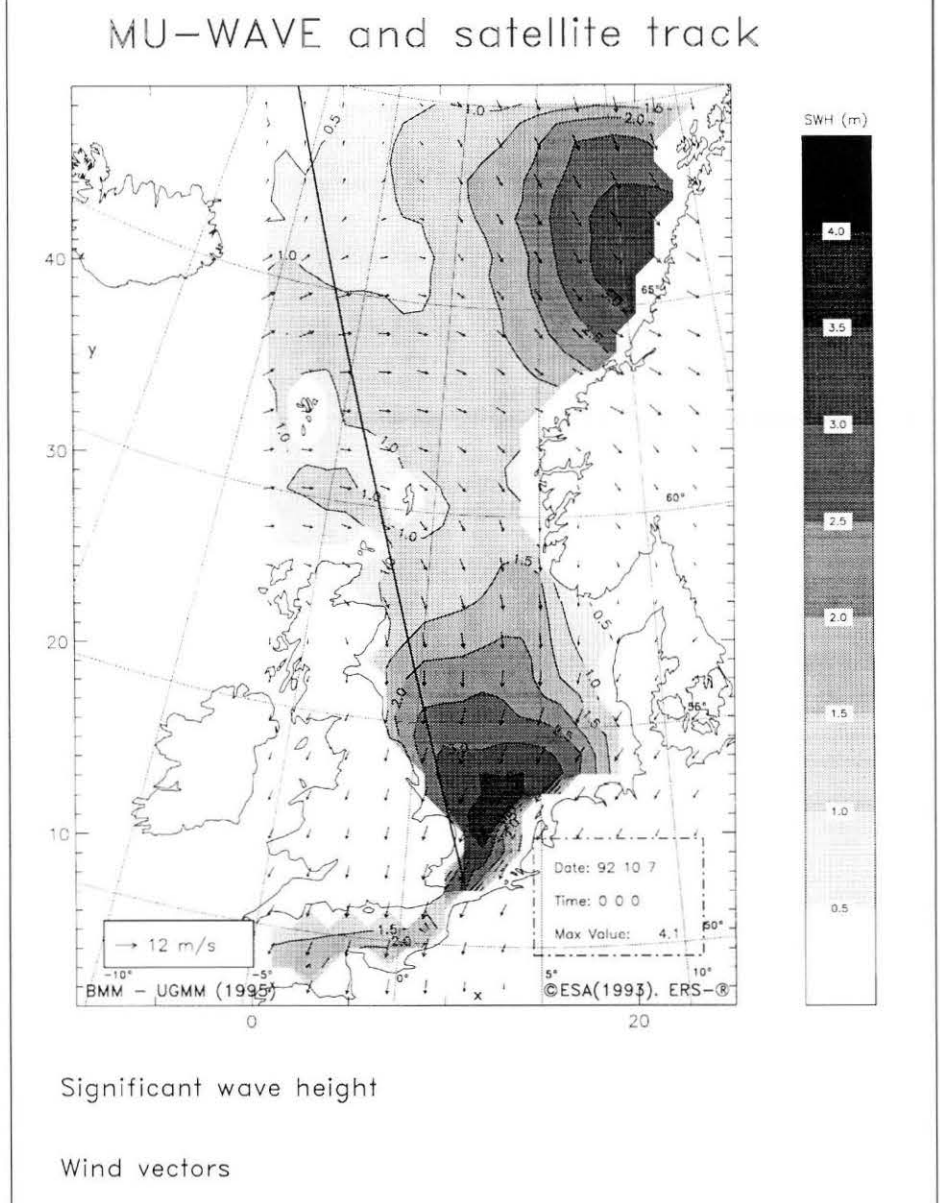
In figuur 5 wordt een voorbeeld gegeven van een golfvoorspelling over het volledig gemodelleerde domein. In figuur 6.a en 6.b worden enerzijds de vergelijking van de voorspelde en waargenomen golfhoogte langs de satellietbaan en anderzijds de bij de voorspelling gebruikte en waargenomen windsnelheid voorgesteld.

Men kan gemakkelijk vaststellen uit figuur 6 dat de voorspellingen in het zuidelijke gedeelte van het domein (kleine y-waarden) vrij goed is. Deze vaststelling is ook terug te vinden in de statistische vergelijking tussen de resultaten van beide modellen en de satellietgegevens. Deze vergelijking is opgenomen in tabel 2. Bias is het systematische verschil tussen waarnemingen en berekeningen (positief betekent overschatting door het model). De scatter-index (S.I.) is een maat voor de relatieve afwijking van waarnemingen en berekeningen (gedefinieerd als de root mean square error (RMSE) gedeeld door de vierkantswortel van het gemiddelde van de waarnemingen vermenigvuldigd met het gemiddelde van de berekeningen).

Tabel 2 : Statistische analyse voor de significante golfhoogte (Hs) voor de volledige periode van 6 maanden (uitgezonderd een week rond Nieuwjaar en de laatste dag van maart).
(©ESA(1993).ERS-®.)

gebied	Hs bias [m]		Hs S.I.		Hs RMSE [m]	
	MU-WAVE	WAM	MU-WAVE	WAM	MU-WAVE	WAM
volledig gebied	0.78	0.77	0.41	0.38	1.18	1.08
Kanaal	0.77	0.74	0.60	0.58	0.90	0.87
Noordzee	0.27	0.31	0.26	0.28	0.57	0.61
open zee	0.91	0.88	0.42	0.38	1.29	1.17

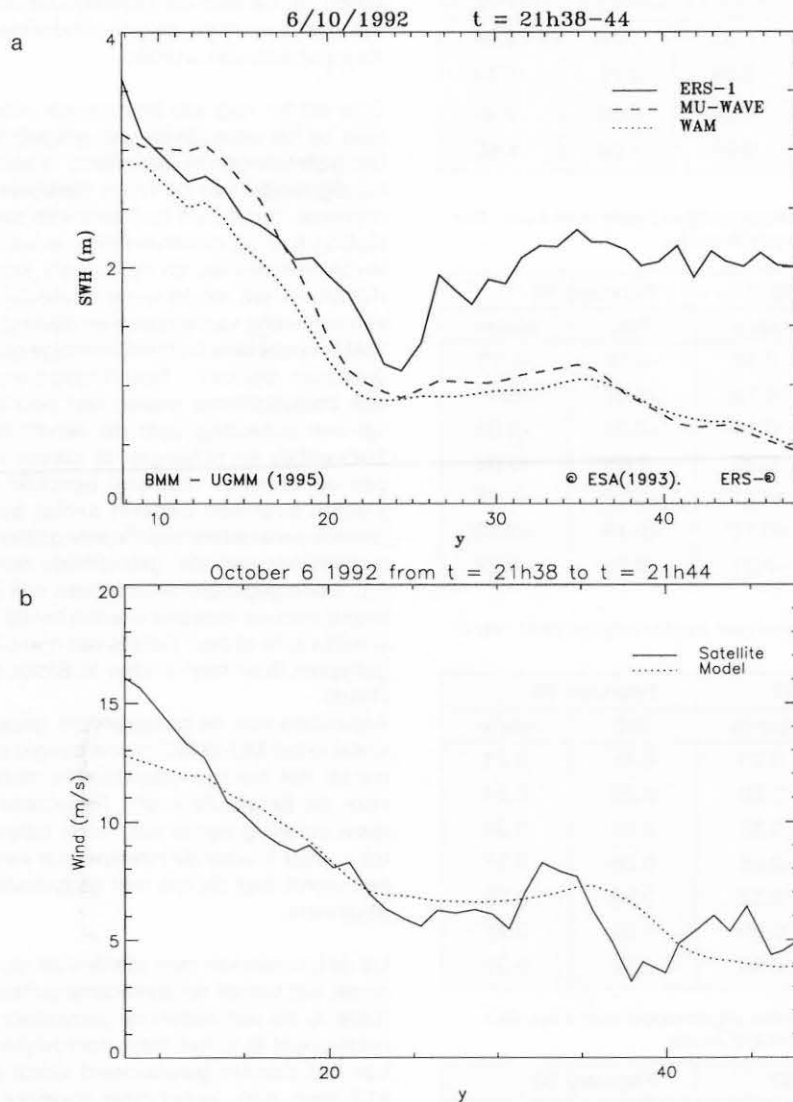
Figuur 5 : MU-WAVE output voor domein met grove grid op 7 oktober 1992 om 0 GMT. De voorspelde significante golfhoogte en het windveld zijn voorgesteld (voor de duidelijkheid wordt maar 1 windvector op 4 voorgesteld). Ook het grondspoor van de ERS-1 satelliet die twee uur voordien over het domein vloog, is aangeduid.



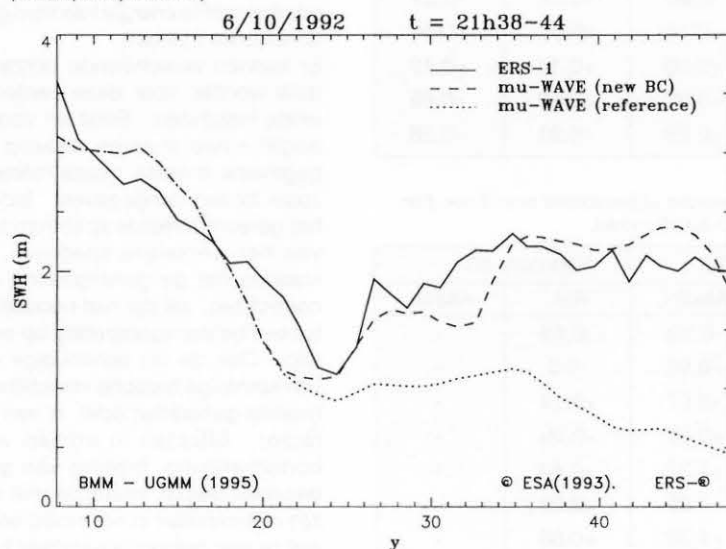
De voorspellingen in het noordelijk gedeelte van het domein zijn minder goed, alhoewel de winden vrij nauwkeurig zijn (figuur 6.b). Uit het onderzoek is dan ook gebleken dat golven in het noorderlijk deel van het do-

mein systematisch onderschat werden. De reden is volledig terug te vinden in de randvoorwaarde opgelegd aan de noordelijke rand (hier een bepaalde hoeveelheid energie, al dan niet afhankelijk van de lokale windsnelheid). Eén van de meest voor de hand liggende vragen is dan ook hoe deze randvoorwaarde kan verbeterd worden. Het antwoord lag in het gebruik van de gegevens afkomstig van een globaal model. Het WAM-model draait namelijk in het ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast in Reading) operationeel voor de gehele aardbol sinds juli 1992 en produceert op systematische basis voorspellingen voor 10 dagen. Bij het gebruik van deze gegevens langs de open randen werd een aanzienlijke verbetering van de hindcast verkregen, zie figuur 7.

Figuur 6 : Vergelijking tussen de uitgemiddelde satellietwaarnemingen en de resultaten van de modellen MU-WAVE en WAM langs het grondspoor. Zowel de significante golfhoogte (a) als de windsnelheid (b) worden weergegeven als functie van de y-coördinaat van het satellietgrondspoor. (©ESA(1993).ERS-®.)



Figuur 7 : Vergelijking tussen de significante golfhoogte zoals gemeten door de ERS-1 satelliet en het MU-WAVE model zonder en met de nieuwe randvoorwaarde. (©ESA(1993).ERS-®.)



Alhoewel de resultaten van het model aanzienlijk werden verbeterd voor het noordelijke deel van het domein (open zee), is de verbetering voor het zuidelijk gedeelte (Noordzee) eerder beperkt. De resultaten voor de periode oktober-december 1992 werden samengevat in tabel 3. In zekere zin wordt hiermee aangetoond dat het gekozen domein voldoende ruim is, zodat de golven die de Belgische kust bereiken meestal binnen dit domein worden gegenereerd.

5. ASSIMILATIE VAN MEETGEGEVENS

De verandering van de open randvoorwaarde in het noorden van het domein door het inbrengen van gegevens afkomstig van een globaal model (zie hoger) had relatief weinig invloed op de resultaten in het zuidelijk gedeelte van het domein, i.e. dat deel waar men goede resultaten wenst. Er werd daarom nagegaan of de kwaliteit van de berekening (voorspelling) kon verbeterd worden door de assimilatie van meetgegevens binnen het domein.

Voor deze toepassing werd gebruik gemaakt van de optimale interpolatietechniek. Deze techniek zorgt voor een optimale combinatie van modelresultaten en metingen. In matrix vorm kan men schrijven:

$$\Psi^a = \Psi^f + MC^T(CMC^T + O)^{-1} (d^o - C\Psi^f)$$

Ψ^a , Ψ^f , en d^o stellen respectievelijk de vectoren voor met waarden van de geanalyseerde (gecorrigeerde) schattingen, van de eerste schattingen van het model en van de gemeten waarden. C is een matrix die de waarden op het modelgrid vertaalt naar de meetpunten, terwijl M de fout-covariantie matrix van waarden van de eerste schattingen van het model is. De matrix O tot slot is de fout-covariantie matrix van de waarnemingen. Voor de wiskundige details en specifieke waarden in te vullen in de fout-covariantie matrices, kan verwezen worden naar Mastenbroek et al. (1994), Ovidio et al. (1995) en Bidlot et al. (1995). Intuïtief kan men echter gemakkelijk begrijpen dat de beste schattingen (Ψ^a) verkregen worden door de eerste schattingen (Ψ^f) te gebruiken en deze dan te corrigeren rekening houdende met de waarnemingen ($d^o - C\Psi^f$). De correctie op de eerste schatting hangt af van de kwaliteit van de eerste schatting en van de waarneming. De kwaliteit van de schatting en van de waarneming is omgekeerd evenredig met de fout-covariantie matrices M en O respectievelijk. Het opstellen van die fout-covariantie matrices is niet eenvoudig en een aantal aannames moeten daarbij gemaakt worden. Men neemt dikwijls (ook hier) aan dat voor de waarnemingen de fouten onderling niet van elkaar afhangen (niet gecorreleerd zijn), zodat enkel termen niet gelijk aan nul overschieten op de diagonaal van de matrix. Fouten op de berekeningen (eerste schattingen) zijn wel gecorreleerd. Er wordt aan-

Tabel 3 : Statistieken voor de significante golfhoogte (Hs) voor de referentierun (oude randvoorwaarde) en de run met de nieuwe randvoorwaarde. (©ESA(1993),ERS-®.)

gebied	Hs bias [m]		Hs S.I.		Hs RMSE [m]	
	oude r.v.	nieuwe r.v.	oude r.v.	nieuwe r.v.	oude r.v.	nieuwe r.v.
volledig gebied	0.79	-0.12	0.44	0.30	1.14	0.94
Kanaal	0.85	-0.15	0.63	0.35	0.97	0.74
Noordzee	0.37	0.18	0.30	0.25	0.56	0.49
open zee	0.90	-0.20	0.45	0.31	1.24	1.03

Tabel 4 : Bias voor significante golfhoogte. Boeiwaarnemingen werden uitgemiddeld over 3 uur. Een positieve bias duidt op een overschatting door het MU-WAVE model.

Station	Oktober 92		November 92		February 93	
	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.
auk	-0.36	-0.24	-0.24	-0.18	-0.18	-0.10
k13	-0.16	-0.10	-0.17	-0.13	+0.07	+0.11
mpn	-0.17	-0.11	-0.18	-0.14	+0.02	+0.03
eur	-0.29	-0.24	-0.25	-0.23	-0.05	-0.02
weh	+0.11	+0.11	+0.09	+0.11	+0.19	+0.19
a2b	+0.05	+0.09	+0.16	+0.17	+0.18	+0.19
bhe	+0.09	+0.13	+0.19	+0.21	+0.21	+0.22

Tabel 5 : Scatter index voor significante golfhoogte. Boeiwaarnemingen werden uitgemiddeld over 3 uur.

Station	Oktober 92		November 92		February 93	
	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.
auk	0.34	0.30	0.21	0.20	0.29	0.24
k13	0.21	0.20	0.20	0.20	0.23	0.24
mpn	0.30	0.29	0.32	0.32	0.33	0.34
eur	0.25	0.22	0.28	0.28	0.26	0.27
weh	0.17	0.23	0.32	0.32	0.29	0.29
a2b	0.20	0.23	0.39	0.39	0.30	0.31
bhe	0.14	0.23	0.38	0.39	0.32	0.32

Tabel 6 : Bias voor gemiddelde periode. Boeiwaarnemingen werden uitgemiddeld over 3 uur. Een positieve bias duidt op een overschatting door het MU-WAVE model.

Station	Oktober 92		November 92		February 93	
	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.
auk	-0.69	-0.43	-0.17	-0.07	-0.39	-0.30
k13	-0.30	-0.21	-0.07	+0.02	-0.35	-0.26
mpn	-0.46	-0.36	-0.51	-0.46	-0.37	-0.34
eur	-0.14	-0.00	-0.12	+0.16	-0.00	+0.09
weh	+0.19	+0.21	-0.07	+0.00	+0.14	+0.19
a2b	+0.54	+0.73	+0.81	+0.87	+0.62	+0.69
bhe	+0.10	+0.28	+0.22	+0.29	+0.21	+0.28

Tabel 7 : Bias voor laagfrequentie energie. Boeiwaarnemingen werden uitgemiddeld over 3 uur. Een positieve bias duidt op een overschatting door het MU-WAVE model.

Station	Oktober 92		November 92		February 93	
	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.	Ref.	Assim.
auk	-0.45	-0.39	-0.26	-0.20	-0.58	-
k13	+0.02	+0.04	+0.03	+0.06	-0.3	-
mpn	-0.07	+0.09	+0.04	+0.07	-0.14	-
eur	+0.01	+0.02	+0.03	+0.05	-0.06	-
weh	+1.30	+1.31	+1.29	+1.32	+0.84	-
a2b	+0.92	+0.97	+1.03	+1.05	+0.68	-
bhe	+0.91	+0.94	+1.10	+1.32	+0.66	-

genomen dat de correlatie tussen de fouten op twee meetpunten afneemt met de afstand tussen die twee meetpunten. Merk hierbij op dat men op die manier niet alleen de berekende golfkarakteristieken kan bijsturen, maar ook de windvelden die als input gebruikt worden.

Er is echter nog een bijkomende moeilijkheid bij het assimileren van golfgegevens. Om golfmetingen te assimileren in een wiskundig model van de types hierboven beschreven moet men hun spectrale samenstelling (i.e. de onderverdeling in verschillende frekwenties en richtingen) kennen. Het MU-WAVE model werkt bovendien met een scheiding van windzee en deining. Het WAM-model beschrijft het volledige golfspectrum discreet. Satellietgegevens (en ook boeigegevens) maken niet noodzakelijk een scheiding over de verschillende frekwenties en richtingen of tussen windzee en deining. Meestal beschikt men slechts over een beperkt aantal geïntegreerde parameters (significante golfhoogte, gemiddelde periode, gemiddelde richting, ...). Deze gegevens moeten dan ook geïnterpreteerd en verwerkt worden om de golfspectra af te leiden. Details van hoe dit kan gebeuren, kan men vinden in Bidlot et al. (1995).

Assimilatie van de golfgegevens gebeurde enkel in het MU-WAVE model aangezien dit model het huidige operationele model is voor de Belgische kust. Resultaten van deze oefening zijn te zien in de tabellen 4 tot en met 7 waar de referentierun vergeleken wordt met de run met geassimileerde gegevens.

Uit de tabellen kan men afleiden dat de bias, zowel wat betreft de significante golfhoogte (tabel 4) als wat betreft de gemiddelde periode (tabel 6) in het meer noordelijke deel van het domein gereduceerd wordt (auk, k13, mpn, eur). In het meer zuidelijke deel van het domein (weh, a2b en bhe) is er geen verbetering meer. Terwijl de scatter-index nauwelijks verandert, wordt de bias zelfs in enkele punten slechter. Ook wat betreft de laagfrequentie energie kan men gelijkaardige conclusies trekken.

Er kunnen verschillende oorzaken aangeduid worden voor deze eerder teleurstellende resultaten. Eerst en vooral is er de nogal ruwe manier waarop de meetgegevens moeten geassimileerd worden, zoals boven aangegeven. Inderdaad, als het gereconstrueerde spectrum te fel afwijkt van het werkelijke spectrum, niettegenstaande dat de geïntegreerde grootheden correct zijn, zal dat niet noodzakelijk leiden tot een betere voorspelling op een later tijdstip. Ook de vrij eenvoudige voorstelling van sommige fysische verschijnselen in een tweede generatiemodel, is een limiterende factor. Effecten in ondiep water zoals bodemwrijving, breking van golven door beperkte diepte, interactie met stromingen, zijn niet expliciet in het model vervat, alhoewel ze een belangrijke invloed kunnen hebben.

ben (Luo, 1995). Een derde generatiemodel zoals het hierboven beschreven WAM-model kan in dit opzicht talrijke voordelen bieden aangezien alle processen expliciet beschreven worden. Een andere beperkende factor is de ruimtelijke resolutie van het meest zuidelijke gebied. De bathymetrie (diepteligging van de zeebodem, cf. topografie voor hoogteligging) is er heel complex door de aanwezigheid van de Vlaamse Banken. Met een 'fijn' grid van 10 x 10 km² kan men deze banken niet onderscheiden en kan men ook niet verwachten (ook niet van een derde generatiemodel) dat men de verschillende processen adequaat kan laten werken in een wiskundig model. Een fijnere resolutie en een derde generatiemodel lijken dus een noodzaak om in dit gebied tot betere resultaten te komen.

Tot slot moet men ook beseffen dat de assimilatie van gegevens afkomstig uit het meest zuidelijke deel van het domein (i.e. de Belgische kustzone), een relatief geringe bijdrage kunnen leveren voor voorspellingen in de Belgische kustzone. Golfenergie plant zich namelijk voort en eenmaal dat deze energie uit het domein is verdwenen (bijv. op het strand toekomt) is ook deze informatie verdwenen. De bestaande gegevens, zoals verzameld door de Afdeling Waterwegen Kust van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, en hopelijk nog aangevuld met de gegevens van enkele wel geplaatste directionele boeien, kunnen echter van onschatbare waarde zijn bij het op punt stellen van een echt fijnmazig model (grootte-orde resolutie 500 m) waarbij op een systematische manier gebruik gemaakt wordt van assimilatietechnieken (zie ook Voorrips et al. 1996).

6. CONCLUSIES

De kwaliteit van de voorspellingen voor de golftoestand van het MU-WAVE en van het WAM-model zijn vergelijkbaar. Het verbeteren van de randvoorwaarden in het noordelijk deel van het modeldomein, leidde tot een aanzienlijke verbetering in het noordelijk deel maar niet of nauwelijks niet tot een verbetering van de kwaliteit van de voorspellingen van de golftoestand aan de Belgische kust, wat erop wijst dat het gekozen domein voldoende groot is om ook golfenergie (windzee en deining) gegenereerd buiten de Belgische kustzone te onderscheppen.

Ook de assimilatie van de ERS-1 altimeter data gaf enkel een toename van de kwaliteit van de voorspellingen van de golftoestand in het noordelijke gedeelte van het gemodelleerde domein. In de omgeving van de Belgische kust (het zuidelijke deel) van het domein zorgt de assimilatie niet voor een verbetering.

Enkel een model van de derde generatie geïmplementeerd op een voldoende fijn rooster, kan in staat geacht worden de complexiteit van de verschillende fysische processen (dissipatie, breking, interactie met

stromingen, getijdewerking, ...) voor de Belgische kustzone op adequate manier voor te stellen.

DANKWOORD

Dit onderzoek werd uitgevoerd in het kader van het European Space Agency Pilot Project PP2-B9. De auteurs willen daarom ESA bedanken voor het gebruik van de altimeter en scatterometer data. De onderzoekers F. Ovidio en J.-R. Bidlot werden financieel gesteund door het Belgisch Ministerie voor Wetenschapsbeleid onder de conventie T3/58/11 van het onderzoeksproject voor 'Remote Sensing', derde fase van TELSAT III.

Wij willen ook het *Rijksinstituut voor Kust en Zee* en de *Afdeling Waterwegen Kust* bedanken voor het ter beschikking stellen van de boeigegevens.

Contactpersoon:

J. MONBALIU

K.U. Leuven, Laboratorium voor
Hydraulica
de Croylaan 2
3001 Leuven

REFERENTIES

Bidlot, J.-R., F. Ovidio and D. Van den Eynde, *ERS-1 Data assimilation in an operational wave model for the North Sea*, submitted to *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1995.

Komen, G.J., M. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P.A.E.M. Janssen, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

Luo, W., *Wind Wave Modelling in Shallow Water with application to the Southern North Sea*, doctoraatsthesis, K.U.Leuven, 1995.

Mastenbroek, C., V.K. Makin, A.C. Voorrips and G.J. Komen, *Validation of ERS-1 altimeter wave height measurements and assimilation in a North Sea wave Model*, *Journal of Geophysical Research*, 97, 14453-14474, 1994.

Monbaliu, J.: *Golfvoorspelling: parameter-schatting bij het opstellen van een wiskundig model*, *Water* 69, 51-57, 1993.

Ovidio, F., J.-R. Bidlot and D. Van den Eynde, *Validation and improvement of the quality of the operational wave model MU-WAVE by the use of ERS-1 satellite data*, MUMM/T3/AR05, Final Report European Space Agency Pilot Project PP2-B9, 1995.

Van den Eynde, D. en P. De Wolf, *Deiningsprediktie aan de Belgische kust*, *Water* 52, 163-167, 1990.

Voorrips, A.C., V.K. Makin, and S. Hasselmann, *Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a North Sea wave model*, submitted to *Journal of Geophysical Research*.

WERKINGSPRINCIPE INSTRUMENTATIE

Altimeter

De Radar Altimeter is een Ku-band (13.8 Ghz) nadir-gerichte actieve microgolf sensor ontworpen om de echo-tijd van het van het oceaan- of ijsoppervlak terugkerende signaal, te meten. Ook de vorm van het terugkerende signaal is van belang aangezien de vorm bepaald wordt door de ruwheid van het wateroppervlak (golven). Het instrument kan gebruikt worden in twee operationele modes (oceaan of ijs). In oceaan-mode verschaft het informatie over de golfhoogte, windsnelheid aan het oceaan-oppervlak en waterstand van het zeeoppervlak (gerelateerd aan zee- en ijsstromingen, de geolde en de getijden). In ijs-mode geeft het verschillende gegevens over ijs en ijsplaten. Vooraleer over te schakelen op één van de operationele modes, werkt het instrument in de zogenaamde acquisitie-mode. In die mode vindt de radar eerst een benaderende schatting van de afstand tot het water- of ijsoppervlak.

Wind Scatterometer

De Wind Scatterometer gebruikt drie zijdelings kijkende antennes, één ervan wijst loodrecht op de vluchtlijn van de satelliet, één ervan wijst 45° voorwaarts en de derde wijst 45° achterwaarts. Deze antennes stralen belichten een strook van 500 km breed terwijl de satelliet voortijlt langs haar baan. De stralen worden weerkaatst door het wateroppervlak. Het resultaat is drie onafhankelijke backscatter (reflectie) metingen verkregen voor de verschillende kijkrichtingen. De echo-kracht van het signaal is een functie van de oppervlaktewindsnelheid. Deze metingen zijn van elkaar gescheiden door een heel korte tijdsvertraging. De berekening van de windvector aan het aardoppervlak in termen van snelheid en hoek, maakt gebruik van een mathematisch model waarin de relatie tussen backscatter, windsnelheid, windrichting en invalshoek van de waarneming vastgelegd is.

Synthetic Aperture Radar (SAR)

De golf-mode van de SAR wordt gebruikt om veranderingen in de radar-reflectiviteit van het wateroppervlak te wijten aan oppervlaktegolven, te meten. Dit instrument bezorgt beelden van 5 km x 5 km (zogenaamde "imagettes") met tussenafstanden van 200 km langs de satellietbaan. Deze beelden worden omgevormd in spectra die ons informatie bezorgen omtrent de golflengte en richting van het golvensysteem. Series van spectra kunnen gebruikt worden om de evolutie van deiningsgolven te meten. Ook andere fenomenen kunnen met dit instrument gedetecteerd en bestudeerd worden, o.a. interne golven, vlekken (zoals van olie), veranderingen van de wind op kleine ruimtelijke schaal, modulatie door zeestromingen en de aanwezigheid van ijs.

Diegenen die meer informatie wensen kunnen terecht op internet:
<http://www.belspo.be/telsat>